

УДК 621.891:539.3

## К ВОПРОСУ ОБ ОПРЕДЕЛЕНИИ ИНТЕНСИВНОСТИ ИЗНОСА МАТЕРИАЛОВ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС

**В. В. КОМРАКОВ**

*Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого»,  
Республика Беларусь*

### Введение

Испытания для определения характеристик изнашивания материалов зубчатых колес, как правило, проводят по схеме контакта ролик–ролик. При этом ролики обычно изготавливают цилиндрической формы. Характеристики изнашивания определяют по скорости изменения массы или геометрических параметров образцов. Эти изменения обычно чрезвычайно малы при приемлемом времени проведения эксперимента.

Более точно характеристики изнашивания можно определить методами, основанными на измерениях размеров пятна площадки контакта изменяющихся в процессе износа. Для этого необходимо использовать схемы испытаний с точечным начальным контактом контртел.

### Цель работы

Разработка новой экспериментальной методики определения интенсивности износа материалов зубчатых колес с использованием стандартных роликовых машин трения.

### Методика исследования

Для проведения экспериментов были изготовлены ролики из стали 45 различных радиусов и с различными радиусами бочкообразной образующей. При этом радиус образующей значительно больше радиуса ролика. Испытания роликов проводились на машине трения СМТ–1 по схеме контакта ролик–ролик качение с проскальзыванием. Во время испытаний применялась смазка окунанием нижнего ролика в емкость с маслом И–40. При этом линейная скорость роликов находилась в пределах 0,15–0,3 м/с; частота вращения нижнего ролика – 255 об/мин, верхнего ролика – 210 об/мин; нагрузка на ролики изменялась от 50 до 175 Н; время испытаний каждой пары роликов составило в среднем 20 часов.

Рассмотрим трибоузел, состоящий из двух роликов с бочкообразными образующими (рис. 1). В этом случае имеем первоначальный точечный контакт, который при приложении силы  $P$  переходит в эллиптическую площадку контакта.

Интегральное уравнение, описывающее распределение давления по площадке контакта имеет вид [1]:

$$\left( \delta - \frac{x^2}{2R_1} - \frac{y^2}{2R_2} \right) = \frac{\vartheta_1 + \vartheta_2}{2\pi} \iint_{\Omega} \frac{1}{R} p(x_1, y_1) dx_1 dy_1, \quad (x, y) \in \Omega, \quad (1)$$

где

$$\frac{1}{R_1} = \frac{1}{R'_1} + \frac{1}{R'_2}, \quad \frac{1}{R_2} = \frac{1}{R''_1} + \frac{1}{R''_2}; \quad (2)$$

$$\vartheta_1 = \frac{1 - \nu_1^2}{\pi E_1}, \quad \vartheta_2 = \frac{1 - \nu_2^2}{\pi E_2};$$

$p(x, y)$  – контактное давление на площадке контакта;  $E_1, E_2$  и  $\nu_1$  и  $\nu_2$  – соответственно модули упругости первого рода и коэффициенты Пуассона материалов первого и второго роликов;  $R'_1, R'_2$  – радиусы бочкообразных образующих роликов,  $R''_1, R''_2$  – радиусы первого и второго роликов, соответственно (рис. 1).

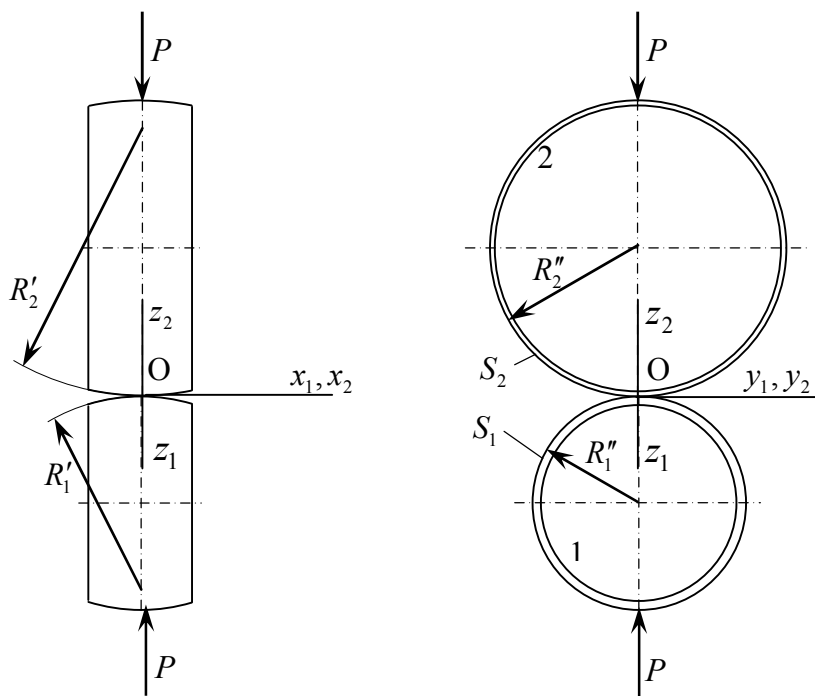


Рис. 1. Схема трибоузла

Решение уравнения (1) описывается группой выражений:

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{K(e) - E(e)}{\frac{1}{1-e^2} E(e) - K(e)}, \quad (3)$$

$$a = \left\{ \frac{3}{2\pi} (\vartheta_1 + \vartheta_2) R_1 P \frac{1}{e^2} [K(e) - E(e)] \right\}^{1/3}, \quad (4)$$

$$b = a \sqrt{1 - e^2}, \quad (5)$$

$$\delta = \frac{3}{4} p_c (\vartheta_1 + \vartheta_2) b K(e), \quad (6)$$

$$p(x, y) = \frac{3}{2} p_c \left( 1 - \frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2} \right)^{1/2}, \quad (7)$$

где

$$p_c = \frac{P}{\pi a b} = \frac{P}{\pi a^2 \sqrt{1 - e^2}}.$$

$K(e)$ ,  $E(e)$  – полные эллиптические интегралы;  $e$  – эксцентриситет эллиптической площадки контакта;  $a$  и  $b$  – большая и меньшая полуоси эллиптической площадки контакта, соответственно;  $\delta$  – сближение упругих тел.

Известно, что в любой точке линии зацепления зубчатых колес (кроме полюса зацепления) происходит качение с проскальзыванием [2]. При этом скорость скольжения изменяется от нулевого значения в полюсе зацепления до некоторого предельного значения в начальной и конечной точках зацепления.

Интенсивность изнашивания роликов в случае их качения с проскальзыванием можно определить по формуле [3]:

$$I = K \cdot p(x, y)^\alpha \cdot \left| \frac{V_1(x, y)}{V_2(x, y)} - 1 \right|^\beta, \quad (8)$$

где  $K$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$  – безразмерный коэффициент и показатели степени, зависящие от условий проведения эксперимента;  $V_1(x, y)$ ,  $V_2(x, y)$  – значения линейной скорости первого и второго ролика в рассматриваемой точке на площадке контакта.

Введя новый безразмерный коэффициент  $C = K \cdot \left| \frac{V_1(x, y)}{V_2(x, y)} - 1 \right|^\beta$ , выражение (8) можно записать в виде:

$$I = C \cdot p(x, y)^\alpha. \quad (9)$$

Перед началом испытаний на износ, бочкообразные поверхности роликов подвергаем тонировке. Во время вращения роликов площадки контакта занимают ряд положений на бочкообразных поверхностях роликов, которые выстраиваются в дорожку шириной  $2a$ . Будем называть ее дорожкой износа. На этой дорожке во время испытаний происходит удаление тонировки и износ роликов. Точки с максимальной величиной износа располагаются в центре дорожки, по краям дорожки износ равен нулю.

Чтобы перейти от решения задачи о распределении давления по площадке контакта (1–7) к износоконтактной задаче необходимо определить закономерность изменения размеров роликов в результате износа.

Известно [1], что при изнашивании роликов значения радиусов образующих  $R'_1$  и  $R'_2$  увеличиваются, а значения радиусов роликов  $R''_1$  и  $R''_2$  незначительно уменьшаются. Такое изменение радиусов (в соответствии с выражениями (2–5)) приводит к увеличению  $a$ . Меньшая полуось эллиптической площадки контакта  $b$  увеличивается незначительно.

Возможно получить решение обратной задачи. Пусть известны значения большей полуоси эллиптической площадки контакта  $a$  и радиусов образующих роликов  $R'_{1(0)}$ ,  $R'_{2(0)}$  до начала износа роликов. Тогда по увеличению большей полуоси эллиптической площадки контакта  $a$  из выражения (5) определяем новое значение эксцентриситета эллиптической площадки контакта  $e$  (считаем, что размер меньшей полуоси эллиптической площадки контакта остается постоянным). Из выражения (4) определим значение величины  $R_1$ . Выражение (2) связывает между собой величину  $R_1$  и радиусы образующих  $R'_{1(1)}$  и  $R'_{2(1)}$ . Для определения радиусов образующих  $R'_{1(1)}$  и  $R'_{2(1)}$  рассмотрим величину износа в центре площадки контакта (рис. 2).

Следует отметить, что износ каждого ролика пропорционален количеству совершенных им оборотов за время износа, т. е. пропорционален частотам вращения этих роликов. В этом случае справедлива зависимость:

$$\Delta h_1 = \frac{n_1}{n_2} \cdot \Delta h_2, \quad (10)$$

где  $n_1$  и  $n_2$  – частоты вращения нижнего и верхнего роликов, соответственно.

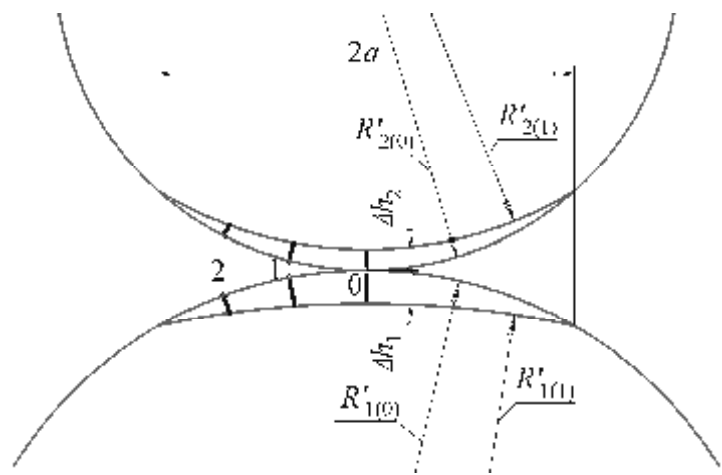


Рис. 2. Изменение радиусов образующих в результате износа

Изменение большей полуоси эллиптической площадки контакта  $a$  определяем по изменению ширины дорожки износа в процессе изнашивания роликов  $2a$ . Определив новые величины радиусов образующих  $R'_{(1)}$  и  $R'_{2(1)}$  после первого шага износа можно найти износ роликов в различных точках дорожки износа. Например, на рис. 2 показана схема определения износа первого ролика в центре дорожки износа (точка 0), а также в произвольных точках (точки 1 и 2) при увеличении радиуса его образующей. Величина износа в рассматриваемых точках показана жирной линией.

Процесс изнашивания роликов по времени рассматриваем дискретно, замеряя через равные промежутки времени  $\Delta t$  ширину дорожки износа на микроскопе ПМТ–3 с точностью  $\pm 0,005$  мм. Таким образом, определяя изменение ширины дорожки износа, находим изменение величины износа в различных точках бочкообразных поверхностей роликов с течением времени.

### Результаты исследований

Величины большей оси эллиптической площадки контакта, полученные экспериментально в начале процесса изнашивания роликов, а также полученные аналитически по формулам (2)–(4) сведены в табл. 1. Определена погрешность экспериментального определения размера большей оси эллиптической площадки контакта.

Таблица 1

Сравнение результатов, полученных аналитически и экспериментально

Номер эксперимента	Размеры роликов				Сила, сжимающая ролики, $H$	Размер большей оси эллиптической площадки контакта, мм		Погрешность, %
	Нижний ролик		Верхний ролик			Аналитическое решение	Экспериментальное решение	
	Радиус ролика, мм	Радиус образующей ролика, мм	Радиус ролика, мм	Радиус образующей ролика, мм				

1	25	150	15	150	1717	3,182	3,25	2,137
2	25	250	15	250	491	2,605	2,7	3,65
3	25	150	15	150	491	2,096	1,9	-9,35
4	25	150	15	250	736	2,642	2,4	-9,16
5	25	200	15	200	981	2,99	2,95	-1,34
6	25	250	20	250	736	2,941	2,92	-0,71
7	20	250	20	250	736	2,97	2,85	-4,04

По результатам экспериментов построены графики изменения ширины дорожки износа от времени при различных нагрузках и проскальзывании роликов. В качестве примера на рис. 3 показаны такие графики для экспериментов № 4 (верхние кривые) и № 7 (нижние кривые).

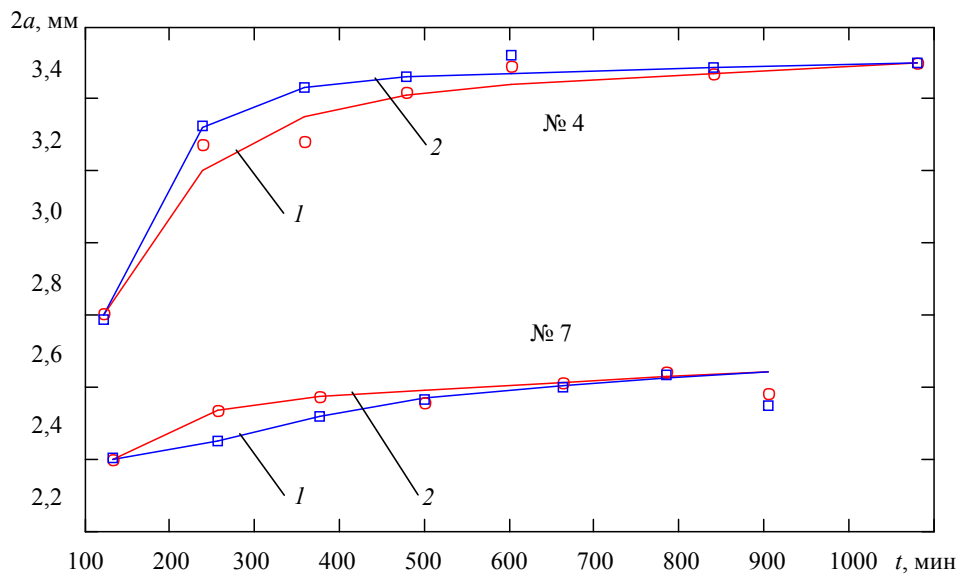


Рис. 3. График зависимости ширины дорожки износа от времени испытаний

Из рис. 3 видно, что на стадии приработки ролик с меньшей линейной скоростью (кривая 1) испытывает меньший износ в отличие от ролика с большей скоростью (кривая 2). На стадии установившегося износа ролики изнашивались одинаково, ширина дорожек износа практически совпадала. На этой стадии износа определялись численные значения безразмерного коэффициента  $K$  и показателей степени  $\alpha$  и  $\beta$ , входящие в выражение (8). Для нахождения этих величин рассматривалась интенсивность износа в нескольких точках, расположенных вдоль большей оси площадки контакта:

$$I_i = \frac{H_i}{S_i \cdot N}, \quad (11)$$

где  $H_i$  – величина износа в  $i$ -й точке площадки контакта за один шаг износа;  $N$  – число оборотов ролика за один шаг износа;  $S_i$  – путь скольжения, пройденный  $i$ -й точкой площадки контакта за один оборот рассматриваемого ролика, определяемый по формуле [4]:

$$S_i = 2 \cdot b_i \cdot \left| \frac{V_1(x, y)}{V_2(x, y)} - 1 \right|.$$

Здесь  $2 \cdot b_i$  – ширина области проскальзывания в  $i$ -й точке. В центре площадки контакта ширина области проскальзывания равна меньшей оси эллиптической площадки контакта  $2 \cdot b$ .

Затем по формуле (7) определялись контактные давления в  $i$ -й точке площадки контакта. Результаты расчетов для каждого эксперимента представлены в виде графиков  $I = f(p)$  с логарифмическими осями координат (рис. 4).

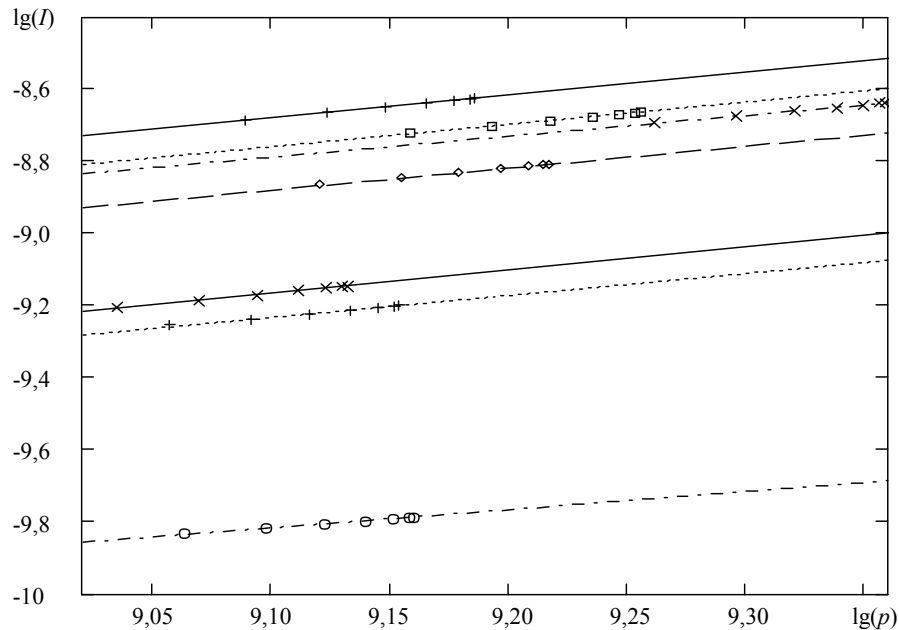


Рис. 4. Зависимость интенсивности изнашивания от контактного давления и проскальзывания роликов

Из этих графиков находим значения безразмерного коэффициента  $C$  и показателя степени  $\alpha$  для каждого эксперимента. Полученные значения сводим в табл. 2. При этом среднее значение показателя степени  $\alpha = 0,621$ , а значение безразмерного коэффициента  $C$  зависит от величины проскальзывания роликов.

Для определения значений  $K$  и  $\beta$  строим график  $C = f\left(\left|\frac{V_1(x,y)}{V_2(x,y)} - 1\right|\right)$  в логарифмических координатах (рис. 5). Из графика находим, что  $K = 0,233 \cdot 10^{-14}$ ,  $\beta = 0,399$ .

В результате получаем следующее выражение для определения интенсивности износа:

$$I = 0,233 \cdot 10^{-14} \cdot p(x,y)^{0,621} \cdot \left|\frac{V_1(x,y)}{V_2(x,y)} - 1\right|^{0,399}, \quad (12)$$

которое справедливо для рассмотренных выше условий проведения эксперимента.

Таблица 2

Результаты определения величин  $C$  и  $\alpha$

Номер эксперимента	Размер большей оси эллиптической площадки контакта в начале стадии установившегося износа, мм	Размер большей оси эллиптической площадки контакта за время $\Delta t$ проведения эксперимента, мм	Время проведения эксперимента $\Delta t$ , мин	Показатель степени $\alpha$	Безразмерный коэффициент $C \times 10^{-14}$	Обозначение точек, полученных экспериментальным путем	Обозначение аппроксимирующих прямых

1	3,51	3,53	80	0,638	0,247	× × × ×	-----
2	2,84	2,86	120	0,618	0,252	× × × ×	————
3	2,28	2,31	123	0,654	0,235	+ + + +	————
4	2,88	2,90	122	0,628	0,254	◇ ◇ ◇ ◇	-----
5	3,24	3,27	120	0,642	0,249	□ □ □ □	.....
6	3,23	3,25	123	0,610	0,178	+ + + +	.....
7	3,37	3,82	240	0,557	0,126	o o o o	- - - - -

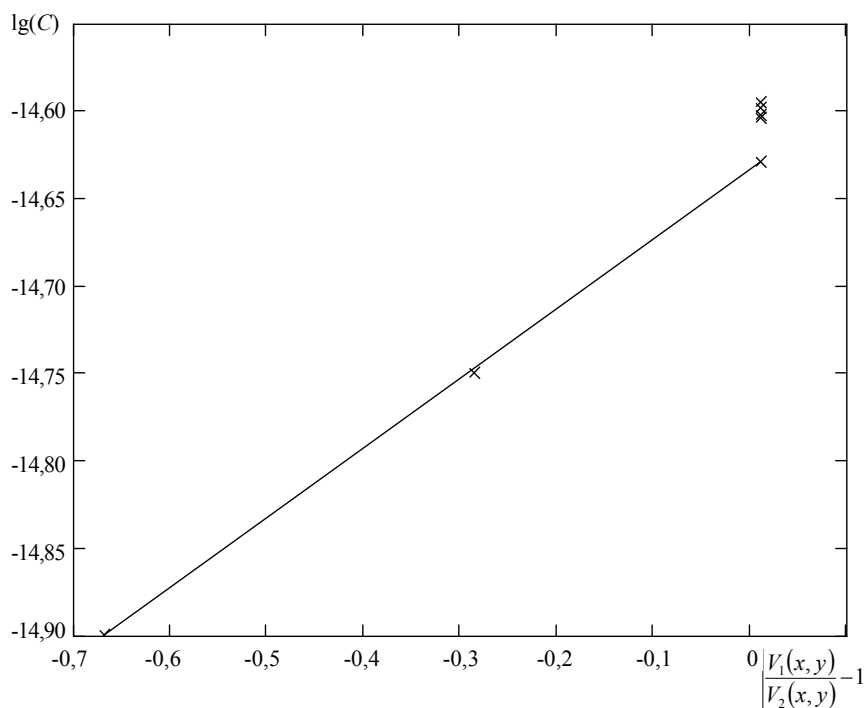


Рис. 5. Зависимость безразмерного коэффициента  $C$  от проскальзывания роликов

#### Достоинства методики

1. Высокая чувствительность измерения износа роликов в результате того, что изменение ширины дорожки износа на одну сотую миллиметра соответствует величина максимального износа в несколько десятых долей микрометра. При этом возможно дальнейшее повышения точности измерения износа за счет увеличения радиусов бочкообразных образующих роликов.

2. Возможность оценки характеристик изнашивания тонких поверхностных слоев или тонкослойных покрытий.

3. Измерение величины износа можно проводить без остановки процесса испытаний роликов.

4. Незначительный разброс экспериментальных данных.

5. Использование бочкообразных роликов уменьшает влияние перекоса валов машины трения СМТ–1 на распределение нагрузки в области контакта по сравнению с цилиндрическими роликами.

6. Возможность одновременного рассмотрения процесса износа, происходящего в различных точках дорожки износа роликов.

#### Заключение

Предложенная экспериментальная методика позволяет более точно определять интенсивность износа материалов зубчатых колес за меньшее время испытаний.

Полученные результаты могут быть использованы при расчете трибосопряжений элементов высших кинематических пар с учетом износа.

## Литература

1. Бородачев, Н. М. Решение задачи Герца с учетом изнашивания / Н. М. Бородачев, Г. П. Тариков, В. В. Комраков // Трение и износ. – 2003. – № 6. – С. 16–23.
2. Часовников, Л. Д. Передачи зацеплением (зубчатые и червячные). – Изд. 2-е перераб. и доп. / Л. Д. Часовников. – Москва : Машиностроение, 1969. – 486 с.
3. Жаров, И. А. Новые подходы к определению трибологических параметров пятен контакта колес и рельсов / И. А. Жаров // Трение и износ. – 2000. – № 6. – С. 593–599.
4. Добычин, М. Н. Методика экспериментальной оценки параметров закона изнашивания материала в опытах с качением / М. Н. Добычин, А. В. Морозов, О. Н. Озерский // Трение и износ. – 2006. – № 2. – С. 165–174.

*Получено 27.12.2006 г.*